

ТРЕХФАЗНОЕ НАГРУЗОЧНО-ПИТАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО С ИНТЕГРИРУЮЩЕЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

М.М. Дудкин

Рассматриваются структура, принцип действия и результаты компьютерного моделирования трехфазного нагрузочно-питающего устройства (НПУ) с интегрирующей системой управления, предназначенного для испытания и исследования электротехнического оборудования, в том числе и преобразователей электрической энергии. В отличие от известных нагрузочных устройств, предложенное НПУ обеспечивает двунаправленный поток мощности. Это делает возможным испытывать и исследовать преобразователи электрической энергии, как в выпрямительном, так и инверторном режимах. Кроме того, НПУ обладает высокими энергетическими показателями, а также является энергосберегающим.

Ключевые слова: нагрузочно-питающее устройство, активный выпрямитель, автономный инвертор напряжения, система управления, интегрирующий развертывающий преобразователь.

Введение. Нагрузочно-питающее устройство (НПУ) – это электротехническое устройство, обеспечивающее как нагрузку (потребление энергии), так и питание (подвод энергии) к испытуемому (исследуемому) электрическому оборудованию, в том числе и к преобразователям электрической энергии.

При испытании электрических машин, трансформаторов, автономных инверторов и других преобразователей электрической энергии чаще всего применяются дискретно регулируемые активные, активно-индуктивные или активно-емкостные нагрузки, содержащие реостат [1]. Такие устройства обладают рядом существенных недостатков: сложностью одновременной плавной регулировки нагрузки во всех фазах m -фазной нагружаемой системы, трудностью регулирования угла сдвига φ между напряжением и током, невозможностью изменения направления потока мощности и низкой энергоэффективностью, так как вся энергия, преобразуемая электрическими устройствами, поглощается в нагрузочных реостатах, переходит в тепло и рассеивается в окружающую среду. Вследствие этого усложняется проведение испытаний и повышаются затраты.

НПУ, содержащие тиристорные преобразователи, позволяют осуществлять рекуперацию энергии в сеть, т. е. изменять направление потока мощности [2]. Однако их использование возможно только на постоянном токе. Такие устройства имеют низкий коэффициент мощности и искажают сеть, генерируя в нее высшие гармоники.

В качестве нагрузочных устройств на постоянном и переменном токе используют однофазные электронные нагрузки [3]. Они улучшают энергетические показатели, но не позволяют изменять направление потока мощности и исследовать трехфазные нагрузки.

В Южно-Уральском государственном университете на кафедре «Электропривод и автоматизация промышленных установок» впервые предложено трехфазное нагрузочно-питающее устройство (НПУ) [4], которое позволяет исследовать различные нагрузки, например, трехфазные трансформаторы, автономные инверторы напряжения, преобразователи частоты, машины переменного тока в генераторном режиме и др., обеспечивая двунаправленный поток мощности: от нагрузки в сеть (режим нагрузки) и от сети в нагрузку (режим питания). НПУ характеризуется высокими энергетическими показателями, а также обеспечивает плавное регулирование тока нагрузки и угла сдвига φ между напряжением и током во всех его фазах (имитация активно-индуктивной или активно-емкостной трехфазных нагрузок).

1. Функциональная схема трехфазного нагрузочно-питающего устройства. Трехфазное НПУ [5, 6] состоит из двух активных выпрямителей напряжения АВН1 и АВН2, соединенных между собой и с емкостным накопителем C_d на стороне постоянного тока (рис. 1). Силовые бло-

Расчет и конструирование

ки СБ1, СБ2 активных выпрямителей напряжения представляют собой трехфазные транзисторно-диодные мосты с индуктивными накопителями (реакторами) $L1, L2$ на стороне переменного тока. На выходах АВН1 и АВН2 установлены электромагнитные фильтры ЭМФ1 и ЭМФ2, обеспечивающие подавление высокочастотных гармоник, соответствующих частотному спектру широтно-импульсной модуляции. Если внутри исследуемого электрического устройства нет потенциальной развязки или уровень напряжения на выходе отличается от сетевого, то АВН2 подключается к сети через трансформатор TV .

АВН2 выполняет две функции:

1) работает на сеть переменного тока, обеспечивая двунаправленный поток мощности с высокими энергетическими показателями ($\cos\varphi \approx 1$ и коэффициент мощности $\chi \approx 1$), что достигается за счет формирования синусоидального тока, совпадающего по фазе или противофазного напряжению сети;

2) стабилизирует постоянное напряжение U_d на емкостном накопителе C_d .

Система управления СУ2 АВН2 (рис. 1) построена по векторному принципу с ориентацией по вектору напряжения сети [7, 8].

Преобразованная трехфазная / двухфазная система координат синхронизирована с частотой и фазой напряжения сети A, B, C . Для этого в СУ2 введен блок синхронизации (БС), обеспечивающий генерацию опорных единичных сигналов $\sin(\omega t)$ и $\cos(\omega t)$, синхронизированных с напряжением сети через датчик напряжения ДН5.

В блоке синхронного преобразования координат dq/abc вычисляются амплитудные значения активной I_{dm} и реактивной I_{qm} составляющих токов в системе dq -координат, вращающейся относительно неподвижной системы $\alpha\beta$ с угловой скоростью ωt напряжения сети. Вычисление токов I_{dm} и I_{qm} осуществляется с использованием единичных сигналов $\sin(\omega t)$ и $\cos(\omega t)$ блока синхронизации и мгновенных значений i_a, i_b, i_c , поступающих с выхода датчиков тока ДТ a , ДТ b , ДТ c трёх фаз преобразователя, по следующим законам:

$$\begin{cases} I_{dm} = 2[i_a \sin(\omega t) + i_b \sin(\omega t - 2\pi/3) + i_c \sin(\omega t + 2\pi/3)]/3; \\ I_{qm} = 2[i_a \cos(\omega t) + i_b \cos(\omega t - 2\pi/3) + i_c \cos(\omega t + 2\pi/3)]/3. \end{cases}$$

Для стабилизации выпрямленного напряжения U_d на емкостном накопителе C_d и расчета амплитуды активной составляющей заданного тока I_{dm}^* в системе управления введен внешний контур напряжения, состоящий из датчика напряжения ДН4, сглаживающего фильтра Φ , источника сигнала задания $U_{d, \text{зад}}$ и пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора напряжения РН с блоком ограничения, ограничивающим амплитуду активной составляющей тока преобразователя $I_{dm, \text{max}}^*$.

Разница между реальными I_{dm}, I_{qm} и заданными I_{dm}^*, I_{qm}^* значениями токов в системе dq -координат поступает на регуляторы тока РТ d и РТ q пропорционально-интегрального типа для частотной коррекции сигналов рассогласования. С целью достижения высоких энергетических показателей, таких как коэффициент мощности $\chi \approx 1$ и $\cos\varphi \approx 1$, в системе рекомендуется задавать $I_{qm}^* = 0$.

В блоке обратного преобразования координат abc/dq вычисляются мгновенные значения заданных напряжений u_a^*, u_b^*, u_c^* , поступающих на вход трехфазной широтно-импульсной модуляции второго рода $PWM-2$ (*Pulse-Width Modulation*) с использованием единичных сигналов $\sin(\omega t)$ и $\cos(\omega t)$ устройства синхронизации и выходных напряжений U_d^*, U_q^* регуляторов тока РТ d и РТ q . Расчет производится в соответствии с выражениями:

$$\begin{cases} u_a^* = U_d^* \sin(\omega t) + U_q^* \cos(\omega t); \\ u_b^* = U_d^* \sin(\omega t - 2\pi/3) + U_q^* \cos(\omega t - 2\pi/3); \\ u_c^* = U_d^* \sin(\omega t + 2\pi/3) + U_q^* \cos(\omega t + 2\pi/3). \end{cases}$$

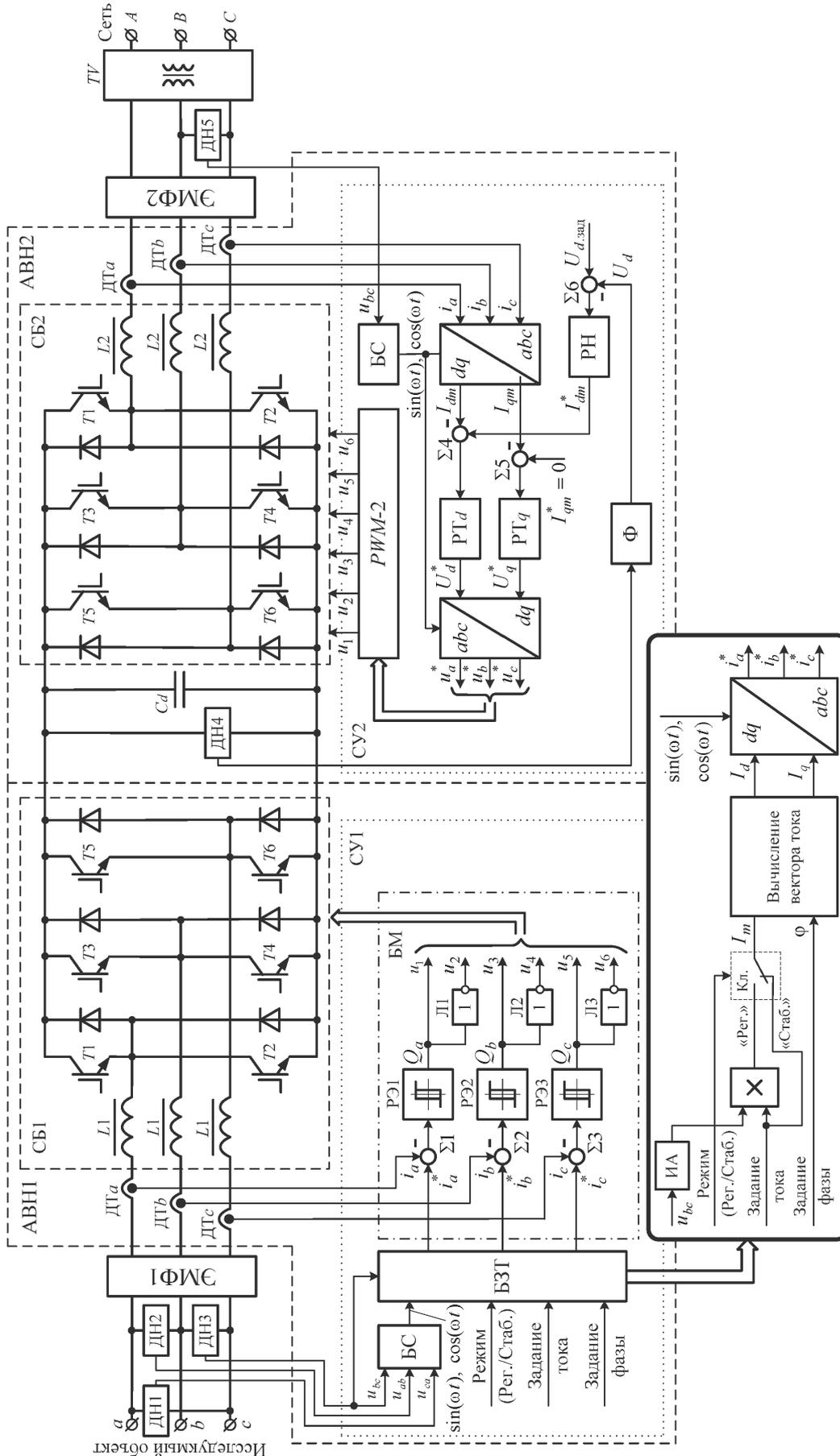


Рис. 1. Функциональная схема трехфазного нагрузочно-питающего устройства

Расчет и конструирование

Формирование выходного трехфазного напряжения в ОПН2 осуществляется с помощью широтно-импульсной модуляции второго рода *PWM-2* [9], широко применяемой ввиду простоты ее реализации и плавности вращения вектора напряжения.

Блок *PWM-2* состоит из трех интегрирующих разветвляющих преобразователей РП-А, РП-В и РП-С с широтно-импульсной модуляцией второго рода (ШИМ-2) [10, 11], генератора пилообразного напряжения (ГПН), общего для РП-А, РП-В и РП-С, и распределителя импульсов РИ (рис. 2, а).

Каждый из РП фаз *A, B, C* представляет собой замкнутую систему, включающую сумматоры $\Sigma 1$ – $\Sigma 2$, интегратор И1 с постоянной времени $T_{и2}$, релейный элемент РЭ1 с безгистерезисной и симметричной относительно нуля характеристикой, а также инвертор Ин.1 (рис. 2, а).

Перевод РП-А, РП-В и РП-С в режим вынужденных переключений производится от генератора пилообразного напряжения ГПН, формирующего сигнал ведущей разветвляющей функции $Y_{и}(t)$ с линейно нарастающим и спадающим фронтами (рис. 2, в). ГПН представляет собой замкнутую автоколебательную систему, состоящую из интегратора И и релейного элемента РЭ с симметричными порогами переключения $\pm b$ (рис. 2, а). Несущая частота ГПН равна $f_0 = 1/(4\bar{A}_{ГПН}T_{и1})$, где $\bar{A}_{ГПН} = |A_{ГПН}/A|$ – нормированная амплитуда пилообразного напряжения (нормированное значение порогов переключения РЭ); $T_{и1}$ – постоянная времени интегрирования интегратора в ГПН; $\pm A$ – амплитуда выходных импульсов РЭ в ГПН, выбираемая равной амплитуде импульсов на выходе РЭ1–РЭ3 в РП-А, РП-В и РП-С (рис. 2, г).

Ведомые развертки $Y_{иa}(t)$, $Y_{иb}(t)$, $Y_{иc}(t)$ в РП-А, РП-В и РП-С формируются в результате интегрирования суммы или разности выходных импульсов $Y_a(t)$, $Y_b(t)$, $Y_c(t)$ релейных элементов РЭ1–РЭ3 и управляющих воздействий u_a^* , u_b^* , u_c^* (рис. 2, б–г). Переключение ключей $T1$ – $T6$ в стойках моста АВН2 происходит в моменты равенства ведомых $Y_{иa}(t)$, $Y_{иb}(t)$, $Y_{иc}(t)$ и ведущей $Y_{и}(t)$ разверток (рис. 2, в). Статическая функция преобразования РП определяется из выражения $\gamma = t_{2n}/T_0 = 0,5 \cdot (1 + \bar{X}_{ВХ})$, где γ – коэффициент заполнения импульсов силовых ключей; t_{2n} – интервал времени включенного состояния ключей $T2$, $T4$, $T6$ (рис. 2, д–ж); $T_0 = 1/f_0$ – период ШИМ; f_0 – несущая частота ГПН; $\bar{X}_{ВХ} = |X_{ВХ}/A|$ – нормированное значение сигнала управления $X_{ВХ}$; $\pm A$ – амплитуда импульсов на выходе РЭ1 – РЭ3 (рис. 2, г).

Выходные инверторы Ин.1–Ин.3 (рис. 2, а), включенные на выходе РП-А, РП-В и РП-С, служат для преобразования биполярных выходных импульсов $Y_a(t)$, $Y_b(t)$, $Y_c(t)$ релейных элементов РЭ1–РЭ3 (рис. 2, г) в однополярные сигналы Q_a , Q_b , Q_c (рис. 2, д–ж), что необходимо для согласования выходов РП-А, РП-В и РП-С с входом распределителя импульсов управления РИ (рис. 2, а).

Импульсами Q_a , Q_b , Q_c осуществляется управление ключами ($T1$, $T2$), ($T3$, $T4$), ($T5$, $T6$) стоек моста фаз *A, B, C* соответственно (рис. 1, 2, д–ж). Логические инверторы Л1–Л3 в РИ (рис. 2, а) обеспечивают противофазное переключение силовых ключей в АВН2.

Фазное напряжение на выходе силового блока СБ2 (рис. 1), например, в фазе *A* u_{A0} формируется пятью уровнями напряжения: $+(2U_d/3)$, $+(U_d/3)$, 0 , $-(U_d/3)$, $-(2U_d/3)$ (рис. 2, з), где U_d – постоянное напряжение на выходе АВН2.

В общем случае РП, синхронизированный «пилой» по входу РЭ, представляет собой апериодическое звено первого порядка $W(p) = 1/(1 + T_{Э}p)$ [10, 11] с эквивалентной постоянной времени $T_{Э} \approx 0,27 \cdot \bar{T}_{и2} \cdot T_0$. Здесь $\bar{T}_{и2} = T_{и2}/T_{и1}$ – относительная постоянная времени интегратора в РП-А, РП-В и РП-С, выбираемая в диапазоне $2,1 \leq \bar{T}_{и2} \leq 3,0$, когда разрешается компромисс между помехоустойчивостью и быстродействием РП.

Применение интегрирующих РП-А, РП-В и РП-С с ШИМ-2 в блоке *PWM-2* обеспечивает высокую помехоустойчивость системы управления АВН2 по отношению к сигналам внешних помех с частотным спектром, близким или превышающим частоту несущих колебаний f_0 РП [10, 11].

АВН1 имитирует заданное комплексное сопротивление нагрузки за счет системы управления СУ1 (см. рис. 1), которая состоит из блока синхронизации (БС), блока задания тока (БЗТ) и блока модуляции (БМ).

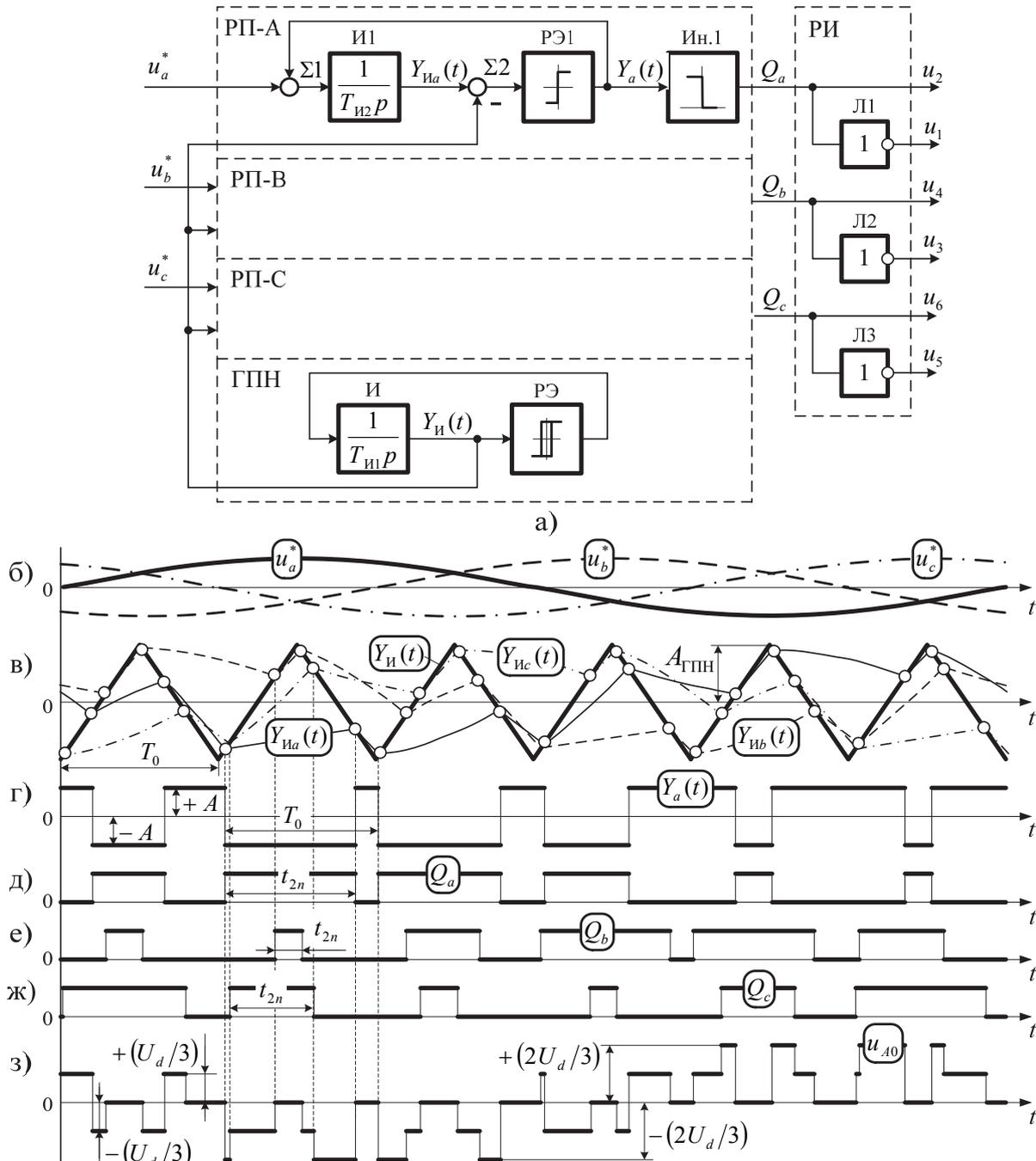


Рис. 2. Структурная схема блока широтно-импульсной модуляции второго рода (а) и временные диаграммы его сигналов (б–з) для трехфазного АВН2

Блок синхронизации БС, также как и в СУ2 АВН2, обеспечивает генерацию опорных единичных сигналов $\sin(\omega t)$ и $\cos(\omega t)$, синхронизированных по частоте и фазе с напряжением исследуемого объекта через датчики напряжения ДН1–ДН3 (рис. 1).

Формирование токовых сигналов управления i_a^* , i_b^* , i_c^* , синхронизированных с напряжением исследуемого объекта и сдвинутых относительно этого напряжения на заданный угол сдвига φ , в АВН1 осуществляется при помощи БЗТ (рис. 1), который в свою очередь состоит:

– из вычислителя вектора тока нагрузки (рис. 1), который определяет проекции вектора тока в системе dq -координат, вращающейся с угловой скоростью ωt напряжения сети, по формулам:

$$\begin{cases} I_d = I_m \cos\varphi; \\ I_q = I_m \sin\varphi, \end{cases}$$

где I_m – амплитудное значение вектора тока нагрузки, а φ – его фазовый сдвиг;

– блока синхронного преобразования координат (dq/abc), вычисляющего мгновенные значения заданных токов i_a^* , i_b^* , i_c^* с использованием единичных сигналов $\sin(\omega t)$ и $\cos(\omega t)$ блока синхронизации в соответствии с выражениями:

$$\begin{cases} i_a^* = I_d \sin(\omega t) + I_q \cos(\omega t); \\ i_b^* = I_d \sin(\omega t - 2\pi/3) + I_q \cos(\omega t - 2\pi/3); \\ i_c^* = I_d \sin(\omega t + 2\pi/3) + I_q \cos(\omega t + 2\pi/3). \end{cases}$$

БЗТ может работать в двух режимах:

– режим поддержания амплитуды тока (режим «Стаб.»), когда значение заданной амплитуды тока I_m через ключ Кл. непосредственно в одействует на блок вычисления вектора тока (рис. 1);

– режим регулирования («Рег.»), когда осуществляется пропорциональная коррекция амплитуды тока при изменении напряжения исследуемого объекта. Данный режим обеспечивает имитацию активно-индуктивной (активно-емкостной) нагрузки. Для его организации в БЗТ дополнительно введены блок измерителя амплитуды напряжения (ИА) и умножитель (рис. 1). Регулирование фазового сдвига φ между напряжением и током исследуемого объекта осуществляется в обоих режимах.

БМ, входящий в состав системы управления АВН1, представляет собой релейную систему [12, 13] с обратной связью по токам i_a , i_b , i_c , поступающим с выхода датчиков ДТа, ДТб, ДТс (рис. 1). В нем осуществляется непосредственное «слежение» реальных токов i_a , i_b , i_c за их заданными значениями i_a^* , i_b^* , i_c^* , формируемыми БЗТ, в пределах зоны неоднозначности порогов переключения $\pm b$ релейных элементов РЭ1–РЭ3. Сумматоры $\Sigma 1$ – $\Sigma 3$ вычисляют разницу $\Delta i_a = i_a^* - i_a$, $\Delta i_b = i_b^* - i_b$ и $\Delta i_c = i_c^* - i_c$ между заданными и фактическими значениями мгновенных токов.

Состояние выходов релейных регуляторов Q_a , Q_b , Q_c определяется по алгоритму:

$$\begin{cases} Q_a = 1, \text{ если } \Delta i_a \geq -b; Q_a = 0, \text{ если } \Delta i_a \leq +b; \\ Q_b = 1, \text{ если } \Delta i_b \geq -b; Q_b = 0, \text{ если } \Delta i_b \leq +b; \\ Q_c = 1, \text{ если } \Delta i_c \geq -b; Q_c = 0, \text{ если } \Delta i_c \leq +b, \end{cases}$$

где $\pm b$ – пороги переключения РЭ1–РЭ3, которые принимаются равными 2–5 % от амплитуды номинального тока нагрузки.

Релейное управление с обратной связью по току широко применяется в преобразователях вследствие своей простоты и позволяет повысить не только быстродействие, но и точность управления при возмущениях со стороны нагрузки, обеспечив тем самым эффективную защиту преобразователя от перегрузок по току. Известным недостатком этих систем является изменение частоты модуляции в процессе «слежения» за нелинейным, например, синусоидальным сигналом [13].

2. Структурная схема адаптивного интегрирующего блока синхронизации трехфазного НПУ. Одним из наиболее уязвимых с позиций помехоустойчивости каналов системы управления АВН1 и АВН2 являются блоки синхронизации БС (рис. 1), которые должны обеспечить не только формирование опорных единичных сигналов $\sin(\omega t)$ и $\cos(\omega t)$, синхронизированных по частоте и фазе с напряжением исследуемого объекта (сети), меняющегося как по амплитуде, так и по частоте в широком диапазоне, но и высокую помехоустойчивость к сигналам внешних помех, наводимых со стороны синхронизирующих каналов вследствие совместной работы силовых ВП, в том числе и самого НПУ. Этим требованиям в полной мере удовлетворяет адаптивный интегрирующий блок синхронизации (рис. 3, а), в основе которого лежит интегрирующий РП, работающий в режиме внешней синхронизации с частотой напряжения исследуемого объекта или сети [14–16].

Интегрирующий РП (рис. 3, а) состоит из сумматоров $\Sigma 1$ – $\Sigma 2$, интегратора И и релейного элемента РЭ с симметричной относительно «нуля» петлей гистерезиса.

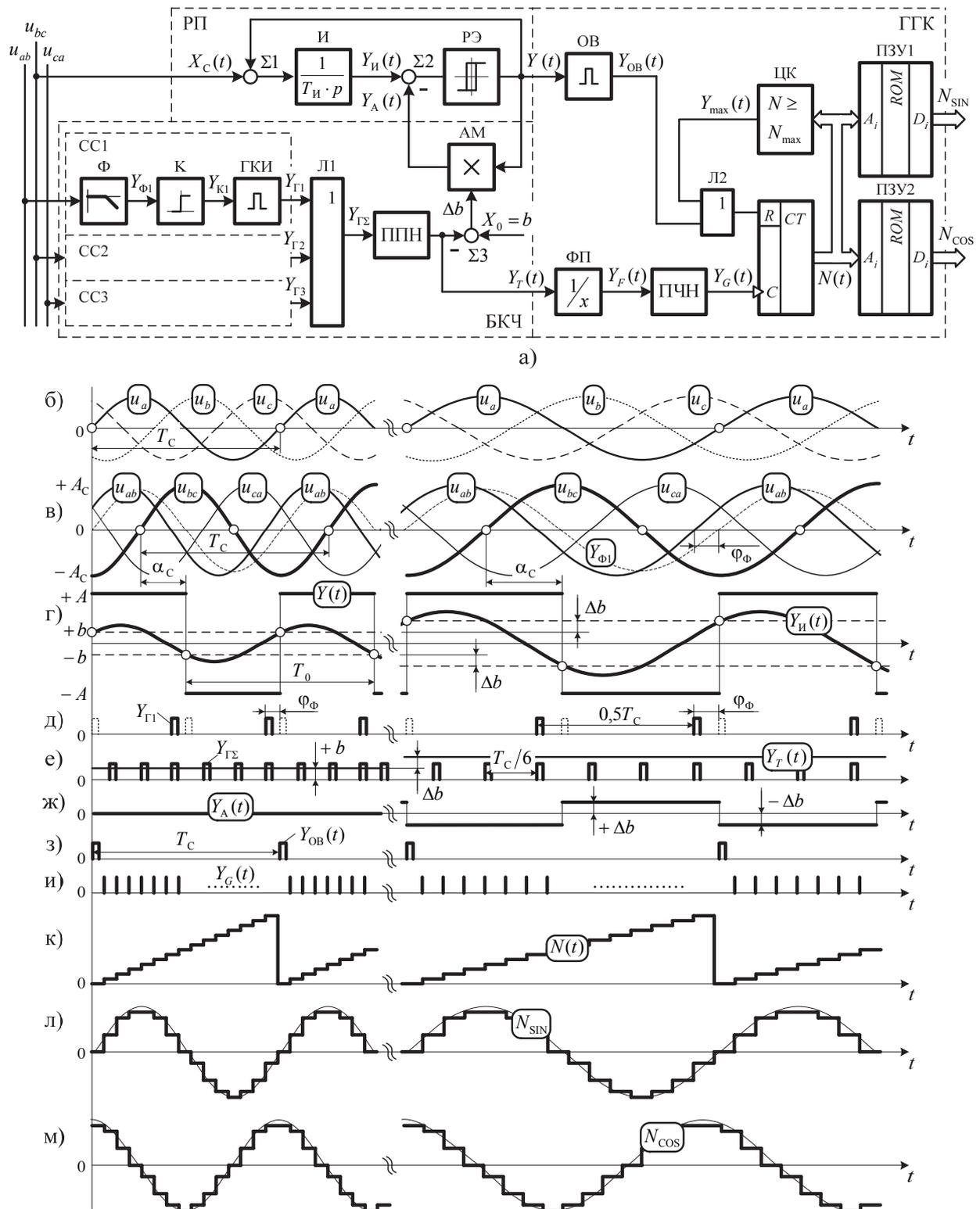


Рис. 3. Структурная схема (а) и временные диаграммы сигналов (б–м) адаптивного интегрирующего блока синхронизации трехфазного НПУ

При воздействии гармонического синхронизирующего сигнала $X_c(t)$, например, линейного напряжения u_{bc} (рис. 3, в), на выходе РП устанавливаются вынужденные колебания, при которых импульсы на выходе РЭ $Y(t)$ сдвинуты относительно напряжения u_{bc} на угол $\alpha_c = -90$ эл. град. (рис. 3, в, г). Для этого необходимо выполнение условия $T_c = T_0$, где T_c – период синхронизи-

Расчет и конструирование

рующего напряжения u_{bc} ; $T_0 = 4\bar{b}T_{И}$ – период собственных автоколебаний РП при отсутствии сигнала $X_C(t)$; $\bar{b} = |b/A|$ – нормированное значение порогов переключения РЭ по отношению к его амплитуде A ; $T_{И}$ – постоянная времени интегратора РП.

В работе [16] показано, что интегрирующий РП, синхронизированный гармоническим внешним воздействием, полностью адаптируется к нестабильности амплитуды напряжения сети в пределах $\pm 50\%$, когда в установившемся режиме работы угол синхронизации α_C сохраняется равным -90 эл. град., а оптимальным уровнем глубины синхронизации $\bar{A}_C = |A_C/A|$ следует считать диапазон $\pi/2 \leq \bar{A}_C \leq 4,0$, когда разрешается компромисс между помехоустойчивостью и быстрым действием РП. Здесь A_C – амплитуда напряжения сети; A – амплитуда выходных импульсов РЭ.

Для адаптации РП к частоте синхронизирующего напряжения $X_C(t)$ в БС введен блок коррекции частоты БКЧ (рис. 3, а), состоящий из трех одинаковых схем синхронизации СС1–СС3, логического элемента Л1 с функцией «ЗИЛИ», преобразователя периода (интервала времени) в напряжение ППН, амплитудного модулятора АМ и сумматора $\Sigma 3$ с источником опорного сигнала $X_0 = b$. Задача БКЧ сводится к тому, чтобы при изменениях частоты сигнала синхронизации в РП всегда выполнялось равенство $T_C = T_0$.

Каждая из схем синхронизации СС1–СС3 (рис. 3, а) содержит апериодический фильтр Φ первого или второго порядка, компаратор К с нулевым порогом срабатывания и генератор коротких импульсов ГКИ, который запускается по переднему и заднему фронтам импульса с выхода К. Основная задача схем СС1–СС3 – это формирование коротких импульсов $Y_{Г1}$, $Y_{Г2}$, $Y_{Г3}$, совпадающих с моментами времени перехода линейных напряжений u_{ab} , u_{bc} , u_{ca} через нулевое значение при условии отсутствия фильтров Φ на входе с последующим суммированием импульсов $Y_{Г1}$, $Y_{Г2}$, $Y_{Г3}$ с помощью логического элемента Л1 (рис. 3, в, д, е). Введение фильтров Φ повышает помехоустойчивость схем СС1–СС3 к внешним помехам и неизбежно приводит к фазовому сдвигу напряжений u_{ab} , u_{bc} , u_{ca} и импульсов $Y_{Г1}$, $Y_{Г2}$, $Y_{Г3}$ на угол φ_Φ (рис. 3, в, д), который при номинальной частоте синхронизирующего напряжения рекомендуется выбирать в диапазоне 20–40 эл. град. Таким образом, на выходе Л1 формируются импульсы $Y_{Г\Sigma}$, следующие друг за другом через 60 эл. град. или $T_C/6$ (рис. 3, е), что позволяет в три раза ускорить процесс преобразования периода T_C в напряжение $Y_T(t)$ в ППН по сравнению со случаем синхронизации БКЧ от одного линейного напряжения, например, u_{bc} .

При номинальной частоте напряжений u_{ab} , u_{bc} , u_{ca} сигнал на выходе ППН $Y_T(t)$ равен по модулю порогу переключения b релейного элемента РЭ (рис. 3, е), поэтому $Y_A(t)$ на выходе АМ равен нулю (рис. 3, ж).

При снижении частоты синхронизирующего напряжения u_{bc} (рис. 3, в) возрастает сигнал $Y_T(t)$ на выходе ППН до уровня $b + \Delta b$ (рис. 3, е), вследствие чего на величину Δb увеличивается порог переключения РЭ (рис. 3, г) при сохранении равенства $T_C = T_0 = 4\bar{b}T_{И}$. В результате, в установившемся режиме работы угол синхронизации α_C между напряжением u_{bc} и выходными импульсами РП $Y(t)$ сохраняется равным -90 эл. град. (рис. 3, в, г), а фронты импульсов $Y(t)$ при условии синхронизации РП линейным напряжением u_{bc} всегда совпадают с моментами перехода фазного напряжения u_a через нулевой уровень (рис. 3, б, г).

В состав адаптивного интегрирующего БС также входит цифровой генератор гармонических колебаний ГГК (рис. 3, а), включающий в себя двоичный суммирующий счетчик СТ, постоянные запоминающие устройства ПЗУ1, ПЗУ2, преобразователь напряжения в частоту импульсов ПНЧ, функциональный преобразователь ФП математической функции $(1/x)$, одновибратор ОВ, цифровой компаратор ЦК и логический элемент Л2 типа «ЗИЛИ».

Синхронизация ГГК с напряжением u_{bc} осуществляется импульсами $Y_{ОВ}(t)$ (рис. 3, з) с выхода ОВ, которые через логический элемент Л2 типа «ЗИЛИ» устанавливаются в счетчике СТ начальный нулевой код (рис. 3, к). Запуск ОВ происходит по переднему фронту сигнала с выхода РП (рис. 3, г, з).

ФП выделяет сигнал $Y_F(t)$, прямо пропорциональный шестикратному значению частоты синхронизирующего сигнала $(T_C/6)^{-1}$ (рис. 3, е), который затем преобразуется с помощью ПНЧ в импульсы $Y_G(t)$ с частотой $(T_G)^{-1}$ (рис. 3, и). Для достижения повышенной временной и температурной стабильности характеристик и помехоустойчивости в адаптивном интегрирующем БС

(рис. 3, а) целесообразно использовать интегрирующий ПНЧ с синфазной амплитудно-частотно-импульсной модуляцией [17–19].

Счетчик CT формирует адресную развертывающую функцию $N(t)$ (рис. 3, к), где каждое значение кода N_i является кодом адреса соответствующей ячейки памяти в ПЗУ1–ПЗУ2, в которых хранятся значения кодов N_{SIN} и N_{COS} соответственно (рис. 3, л, м), аппроксимирующих единичные функции $\sin(\omega t)$ и $\cos(\omega t)$.

В случае возникновения на выходе счетчика CT кода $N \geq N_{\text{max}}$ цифровой компаратор ЦК формирует импульс сброса $Y_{\text{max}}(t)$, предотвращая тем самым обращение к ПЗУ1–ПЗУ2 по несуществующему адресу. Данная ситуация возникает в переходном режиме БС при резком изменении как амплитуды, так и частоты синхронизирующего напряжения u_{bc} .

Результаты исследований, полученные при помощи компьютерного моделирования в программе *MatLab+Simulink*, показали, что адаптивный интегрирующий БС (рис. 3, а) обеспечивает автоподстройку своих характеристик в установившемся режиме при нестабильности амплитуды и частоты синхронизирующего напряжения в пределах $(0,05 \dots 1,5) \cdot U_{\text{ном}}$ и $(0,125 \dots 4) \cdot f_{\text{ном}}$ при $\bar{A}_C = 4,0$. Здесь $U_{\text{ном}}, f_{\text{ном}}$ – номинальные значения действующего напряжения и частоты сигнала синхронизации $X_C(t)$. В динамических режимах допустимая скорость изменения амплитуды за один период синхронизирующего напряжения и частоты за 1 с составляет $\pm 11\%$ и ± 12 Гц/с соответственно при условии, что отклонение угла синхронизации в РП $\Delta\alpha_C$ не превышает ± 2 эл. град., а глубина синхронизации выбирается в диапазоне $0,25 \leq \bar{A}_C \leq 8,0$.

Адаптивный интегрирующий БС (рис. 3, а) обладает также высокой помехоустойчивостью к сигналам внешних помех, формируемых со стороны синхронизирующих каналов вследствие совместной работы силовых вентильных преобразователей, в том числе и НПУ. Повышенная помехоустойчивость достигается за счет замкнутого характера структуры РП и наличия интегратора в прямом канале регулирования (рис. 3, а), а также наличия апериодических фильтров Φ первого или второго порядка в БКЧ.

В адаптивном интегрирующем БС (рис. 3, а) блок коррекции частоты БКЧ может синхронизироваться от одного линейного напряжения u_{bc} при отсутствии СС1, СС3 и логического элемента Л1. В этом случае динамические характеристики УС при отклонении частоты синхронизирующего напряжения ухудшаются до значения ± 5 Гц/с при условии, что отклонение угла синхронизации в РП $\Delta\alpha_C$ также не превышает ± 2 эл. град., а глубина синхронизации выбрана в диапазоне $0,25 \leq \bar{A}_C \leq 8,0$. Статический диапазон изменения амплитуды и частоты синхронизирующего напряжения остается неизменным и равен $(0,05 \dots 1,5) \cdot U_{\text{ном}}$ и $(0,125 \dots 4) \cdot f_{\text{ном}}$ при $\bar{A}_C = 4,0$.

Адаптивный интегрирующий БС (рис. 3, а) целесообразно применять в системе управления АВН1 (рис. 1), поскольку параметры амплитуды и частоты напряжения исследуемых трехфазных нагрузок могут изменяться в очень широком диапазоне.

В системе управления АВН2 (рис. 1), синхронизированной от трехфазной сети A, B, C со стабильными параметрами по частоте, в БС (рис. 3, а) можно исключить блок коррекции частоты БКЧ, а преобразователь напряжения в частоту импульсов ПНЧ заменить на генератор импульсов со стабильной частотой, что существенно позволит упростить и удешевить схему синхронизации.

3. Результаты моделирования трехфазного НПУ в математическом пакете *MatLab+Simulink*. В программе *MatLab+Simulink* была разработана компьютерная модель трехфазного НПУ, на основании которой на рис. 4 приведены осциллограммы токов и напряжений НПУ со стороны нагрузки и сети при исследовании трехфазного автономного инвертора напряжения (АИН). При работе АИН в инверторном режиме энергия за вычетом потерь в НПУ возвращается обратно в сеть (рис. 4, а). Наоборот, в режиме выпрямления НПУ питает АИН со стороны нагрузки, когда оба устройства переходят в режим выпрямления (рис. 4, б). Фазовый сдвиг φ между первой гармоникой фазного напряжения АИН и током нагрузки соответствует 20 эл. град. (рис. 4). Коэффициент мощности χ и $\cos\varphi$ НПУ близки к единице, когда фазовый сдвиг между напряжением и током сети равен нулю в режиме выпрямления (рис. 4, б), либо 180 эл. град. в инверторном режиме (рис. 4, а).

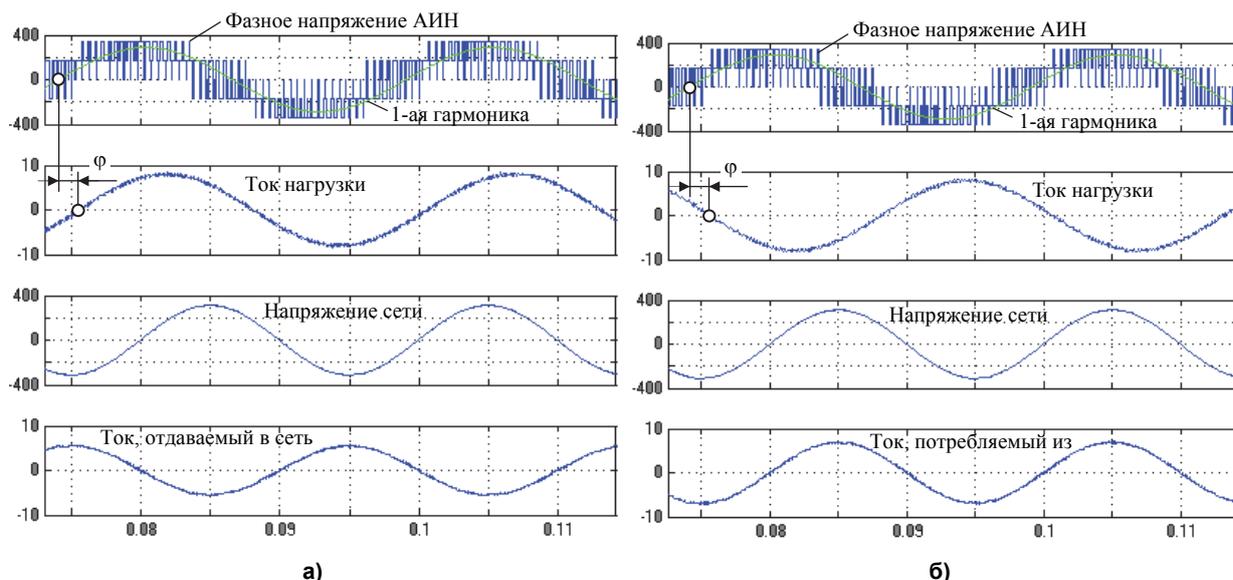


Рис. 4. Осциллограммы токов и напряжений трехфазного НПУ со стороны нагрузки и сети при исследовании трехфазного автономного инвертора напряжения, работающего на активно-индуктивную нагрузку в инверторном (а) и выпрямительном (б) режимах

В работах [20, 21] предложены варианты построения и разработка однофазного НПУ, обеспечивающего испытание и возможность исследования однофазных нагрузок в режимах потребления и рекуперации энергии на постоянном и переменном токе.

Выводы

1. Впервые предложено трехфазное нагрузочно-питающее устройство, позволяющее испытывать и исследовать электротехническое оборудование, например, трехфазные трансформаторы, автономные инверторы напряжения, преобразователи частоты, машины переменного тока и т. д., обеспечивая двунаправленный поток мощности: от нагрузки в сеть (режим нагрузки) и от сети в нагрузку (режим питания).

2. НПУ обеспечивает плавное регулирование тока нагрузки и угла сдвига φ между напряжением и током во всех его фазах (имитация активно-индуктивной или активно-емкостной трехфазных нагрузок), а также позволяет изменять направление потока мощности в системе, подводя или отдавая энергию в сеть, что делает возможным испытывать и исследовать преобразователи электрической энергии как в выпрямительном, так и инверторном режимах. Изменение направления потока мощности при исследовании трехфазных нагрузок на переменном токе не обеспечивает ни одно из известных нагрузочных устройств [2, 3].

3. Предложенное НПУ обладает высокими энергетическими показателями, такими как коэффициент мощности χ и $\cos\varphi$, близких к единице, а также является энергосберегающим, так как вся энергия за вычетом потерь в НПУ, в отличие от пассивных нагрузок [1], возвращается в сеть, что достигается за счет применения двух активных выпрямителей напряжения, соединенных между собой и с емкостным накопителем на стороне постоянного тока. Это позволяет экономить большое количество электрической энергии во время проведения испытаний различных электротехнических устройств, особенно большой мощности.

4. Интегрирующие развертывающие преобразователи с ШИМ-2 обеспечивают высокую помехоустойчивость системы управления АВН2 со стороны информационного канала по отношению к сигналам внешних помех с частотным спектром, близким или превышающим частоту несущих колебаний РП, что объясняется замкнутым характером структуры РП и наличием интегратора в прямом канале регулирования.

5. Адаптивный интегрирующий блок синхронизации, применяемый в системе управления НПУ, обеспечивает автоподстройку своих характеристик в установившемся режиме при нестабильности амплитуды и частоты синхронизирующего напряжения в широких пределах $(0,05 \dots 1,5) \cdot U_{\text{НОМ}}$ и $(0,125 \dots 4) \cdot f_{\text{НОМ}}$, а также высокую помехоустойчивость к сигналам внешних по-

мех, формируемых со стороны синхронизирующих каналов при совместной работе силовых вентиляльных преобразователей, в том числе и самого НПУ.

Литература

1. Котеленец, Н.Ф. Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин: учеб. для вузов / Н.Ф. Котеленец, Н.А. Акимова, М.В. Антонов. – М.: Издат. центр «Академия», 2003. – 384 с.
2. Зорохович, А.Е. Устройства для заряда и разряда аккумуляторных батарей / А.Е. Зорохович, В.П. Бельский, Ф.И. Эйгель. – М.: Энергия, 1975. – 208 с.
3. Дедюхин, А.А. Электронные нагрузки серии АКПП-13хх и их использование для тестирования источников питания / А.А. Дедюхин // Электрон. компоненты. – 2008. – № 6. – С. 91–95.
4. Пат. 2345376 Российская федерация, МПК⁷ G 01 R 31/40. Нагрузочно-питающее устройство / М.В. Гельман, Р.З. Хусаинов, О.Г. Терещина, Р.М. Рахматулин, М.М. Дудкин. – № 2007130645/28; заявл. 10.08.07; опубл. 27.01.09, Бюл. № 3.
5. Гельман, М.В. Нагрузочно-питающие устройства для испытания и исследования преобразователей электрической энергии / М.В. Гельман, М.М. Дудкин // Электричество. – 2013. – № 4. – С. 57–63.
6. Дудкин, М.М. Трехфазное нагрузочно-питающее устройство с высокими энергетическими показателями / М.М. Дудкин // Materialy IX Mezinarodni vedecko-prakticka conference “Moderni Vuzoznosti vedy – 2013”. – Praha: Publishing House “Education and Science” s.r.o., 2013. – Dil 75. Technicke vedy. – P. 73–79.
7. Ефимов, А.А. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока / А.А. Ефимов, Р.Т. Шрейнер; под ред. Р.Т. Шрейнера. – Новоуральск: Изд-во НГТИ, 2001. – 250 с.
8. Malinowski, M. Comparative study of control techniques for PWM rectifiers in FC adjustable speed drives / M. Malinowski, M.P. Kazmierkowski, A.M. Trzynadlowski // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 1997. – Vol. 44. – No. 2. – P. 1390–1396.
9. Соколовский, Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учеб. для вузов / Г.Г. Соколовский. – М.: Издат. центр «Академия», 2006. – 272 с.
10. Дудкин, М.М. Однофазные обратимые преобразователи напряжения для улучшения качества электрической энергии в сетях ограниченной мощности / М.М. Дудкин // Практ. силовая электроника. – 2012. – № 2 (46). – С. 19–27.
11. Дудкин, М.М. Динамические спектральные характеристики развертывающих преобразователей с широтно-импульсной модуляцией / М.М. Дудкин, Л.И. Цытович, О.Г. Брылина // Практ. силовая электроника. – 2012. – № 4 (48). – С. 49–55.
12. Системы скалярного и векторного управления частотными электроприводами с релейным регулятором тока / В.Н. Мецереков, А.М. Башильков, А.С. Абросимов и др. // Труды VII Международной научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу. – Иваново, 2012. – С. 37–41.
13. Дудкин, М.М. Энергетические характеристики однофазных обратимых преобразователей напряжения с различными законами модуляции / М.М. Дудкин // Практ. силовая электроника. – 2010. – № 2 (38). – С. 25–32.
14. Интегрирующее устройство синхронизации с псевдоследящей фиксацией точек естественной коммутации напряжения сети / Л.И. Цытович, М.М. Дудкин, О.Г. Брылина, А.В. Тюгаев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2013. – Т. 13, № 2. – С. 53–61.
15. Адаптивная интервало-кодовая двоично-десятичная интегрирующая синхронизация систем управления силовыми вентиляльными преобразователями / Л.И. Цытович, О.Г. Брылина, М.М. Дудкин, Р.М. Рахматулин // Электротехника. – 2013. – № 3. – С. 8–15.
16. Качалов, А.В. Интегрирующие устройства синхронизации для систем импульсно-фазового управления вентиляльными преобразователями / А.В. Качалов, Л.И. Цытович, М.М. Дудкин // Практ. силовая электроника. – 2010. – № 1 (37). – С. 42–51.
17. Анализ динамики интегрирующего амплитудно-частотно-импульсного развертывающего преобразователя аналоговых сигналов в частоту импульсов / Л.И. Цытович, Р.Х. Гафиятуллин, Р.З. Хусаинов, М.М. Дудкин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2003. – Вып. 3. – № 11(27). – С. 36–40.

18. Аналого-цифровой преобразователь с интегрирующей синфазной амплитудно-частотно-импульсной модуляцией для систем вентиляного электропривода / Л.И. Цытович, О.Г. Брылина, М.М. Дудкин и др. // *Электротехника*. – 2013. – № 5. – С. 10–15.

19. Интегрирующие развертывающие преобразователи с повышенной температурной стабильностью характеристик / Л.И. Цытович, М.М. Дудкин, А.В. Качалов и др. // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. – 2010. – № 10. – С. 38–43.

20. Дудкин, М.М. Энергосберегающие технологии в испытательных стендах с использованием однофазных обратимых преобразователей / М.М. Дудкин // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2013. – Т. 13, № 1. – С. 5–18.

21. Дудкин, М.М. Применение однофазных обратимых преобразователей напряжения для энергосбережения в испытательных стендах / М.М. Дудкин // *Нар. хозяйство. Вопросы инновац. развития*. – 2012. – № 4. – С. 83–93.

Дудкин Максим Михайлович. Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), dudkinmax@mail.ru.

Поступила в редакцию 28 августа 2014 г.

**Bulletin of the South Ural State University
Series “Mechanical Engineering Industry”
2014, vol. 14, no. 3, pp. 49–61**

THREE-PHASE COMBINED LOADING AND FEEDING DEVICE WITH INTEGRATING CONTROL SYSTEM FOR A TESTING AND INVESTIGATING ELECTRICAL EQUIPMENT

M.M. Dudkin, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, dudkinmax@mail.ru

The structure and principle of constructing and results of computer simulation the three-phase combined loading and feeding device (CLFD) with integrating control system intended for testing and investigating electrical equipment including electrical energy converters is considered. In contrast to known loading devices offered CLFD ensures a bidirectional power flow. It makes possible to test and investigate the electrical energy converters both in rectifier and inverter conditions. Besides CLFD has high power performance indicators as well as it is power saving.

Keywords: combined loading and feeding device, active rectifier, independent voltage inverter, control system, integrating scanning converter.

References

1. Kotelenets N.F., Akimova N.A., Antonov M.V. *Ispytaniya, ekspluatatsiya i remont elektricheskikh mashin* [Testing, Maintenance and Repair of Electrical Machines]. Moscow, Akademiya Publ., 2003. 384 p.
2. Zorokhovich A.E., Belskii V.P., Eigel F.I. *Ustroystva dlya zaryada i razryada akkumulyatornykh batarey* [Charge and Discharge Devices for Accumulator Batteries]. Moscow, Energiya Publ., 1975. 208 p.
3. Dedyukhin A.A. [Electronic Loads of a Series AKIP-13xx and their Application for Testing Power Supplies]. *Elektronnyye komponenty* [Electronic Components], 2008, no. 6, pp. 91–95. (in Russ.)
4. Gelman M.V., Khusainov R.Z., Tereshchina O.G., Rakhmatulin R.M., Dudkin M.M. *Nagru-zochno-pitayushchee ustroystvo* [Combined Loading and Feeding Device], Patent RF, no. 2445376, 2009.
5. Gelman M.V., Dudkin M.M. [Combined Loading and Power Supply Devices for Testing and Researching Electrical Energy Converters]. *Electrical Technology Russia*, 2013, no. 4, pp. 57–63. (in Russ.)

6. Dudkin M.M. [Three-Phase Load-Feeding Device with High Power Indexes]. *Materialy IX Mezinárodní Vedecko-Praktická Conference "Moderní Vymoženosti vědy – 2013"*, 2013, Praga, Díl 75, pp. 73–79.
7. Efimov A.A., Shreyner R.T. *Aktivnye preobrazovateli v reguliruemyykh elektroprivodakh peregennogo toka* [Active Converters in Regulated Alternating Current Drives]. Novouralsk, Novouralsk Technical State Institute Publ., 1993. 250 p.
8. Malinowski, M., Kazmierkowski M.P., Trzynadlowski A.M. Comparative Study of Control Techniques for PWM Rectifiers in FC Adjustable Speed Drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1997, vol. 44, no. 2. pp. 1390–1396.
9. Socolovskii G.G. *Elektroprirody peregennogo toka s chastotnym regulirovaniem* [Alternating Current Drives with Frequency Regulation]. Moscow, Akademiya Publ., 2006. 272 p.
10. Dudkin M.M. [Single-Phase Reversible Voltage Converter for Electrical Energy Quality Improvement in Restricted Power Electronic Mains]. *Prakticheskaya silovaya elektronika* [Practical Power Electronics], 2012, no. 2 (46), pp. 19–27. (in Russ.)
11. Dudkin M.M., Tsytoich L.I., Brylina O.G. [Dynamic Spectral Performances of Sweep Converters with Pulse-Width Modulation]. *Prakticheskaya silovaya elektronika* [Practical Power Electronics], 2012, no. 4 (48), pp. 49–55. (in Russ.)
12. Meshcherekov V.N., Bashlykov A.M., Abrosimov A.S. Scalar and Vector Control Systems of Frequency Drives with Relay Current Regulator. *Trudy VII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu* [Proceeding VII International Scientific-Technical Conference on the Automated Drive]. Ivanovo, 2012, pp. 37–41. (in Russ.)
13. Dudkin M.M. [Power Performances of Single-Phase Reversible Voltage Converter with the Different Modulation Principles]. *Prakticheskaya silovaya elektronika* [Practical Power Electronics], 2010, no. 2 (38), pp. 25–32. (in Russ.)
14. Tsytoich L.I., Dudkin M.M., Brylina O.G., Tyugaev A.V. [Integrating Locker with Pseudo-Following by Fixing of Natural Switching Points of Supply-Line Voltage]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2013, vol. 13, no. 2, pp. 53–61. (in Russ.)
15. Tsytoich L.I., Brylina O.G., Dudkin M.M., Rakhmatulin R.M. [Adaptive Interval-Code Binary-Decimal Integrating Synchronization of Control Systems of Power Valve Converters]. *Russian Electrical Engineering*, 2013, no. 84 (3), pp. 122–128. (in Russ.)
16. Kachalov A.V., Tsytoich L.I., Dudkin M.M. [Integrating Lockers for Pulse-Phase Control Systems of Valve Converters]. *Prakticheskaya silovaya elektronika* [Practical Power Electronics], 2010, no. 1 (37), pp. 42–51. (in Russ.)
17. Tsytoich L.I., Gafiatullin R.H., Husainov R.Z., Dudkin M.M. [Analysis of Dynamics the Integrating Amplitude-Frequency-Pulse Sweep Converter of Analog Signals into Frequency of Pulses]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2003, no. 11 (27), pp. 36–40. (in Russ.)
18. Tsytoich L.I., Brylina O.G., Dudkin M.M., Rakhmatulin R.M., Tyugaev A.V. [Analog-Digital Converter with Integrating In-Phase Amplitude-Frequency-Pulse Modulation for Switched Drive Systems]. *Russian Electrical Engineering*, 2013, no. 84(5), pp. 244–249. (in Russ.)
19. Tsytoich L.I., Dudkin M.M., Kachalov A.V., Tereshchina O.G., Loginova N.A. [Integrating Sweep Converters with Heightened Temperature Stability of Performances]. *Pribory i sistemy. Ypravlenie, control, diagnostika* [Devices and Systems. Control, Monitoring, Diagnostics], 2010, no. 10, pp. 38–43. (in Russ.)
20. Dudkin M.M. [Energy-Efficient Technologies in Test Beds with Application of Single-Phase Reversible Converters]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2013, vol. 13, no. 1, pp. 5–18. (in Russ.)
21. Dudkin M.M. [Application of Single-Phase Reversible Voltage Converter for Energy-Saving in Test Beds]. *Narodnoe khozyaystvo. Voprosy innovatsionnogo razvitiya* [National Economy. Questions of Innovation Development], 2012, no. 4, pp. 83–93. (in Russ.)

Received 28 August 2014